

کاربرد منطق فازی در مهندسی عمران با تأکید بر مهندسی و مدیریت ساخت (یک مرور نظام‌مند)

مهدی فضیلتی^۱، محمدنادر فتوحی^{۲*}

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران و مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

Fazilati2001@iau.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ mohammadnader.fotoohi@iau.ac.ir

چکیده

مدیریت ساخت در دهه های اخیر با چالش های گسترده ای همچون عدم قطعیت، پیچیدگی، داده های ناقص و محیط های پویا مواجه بوده است. روش های کلاسیک مدیریت پروژه که بر داده های قطعی و مدل های خطی تکیه دارند توانایی کافی برای تحلیل این شرایط را ندارند. منطق فازی به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند هوش مصنوعی، توانایی بالایی در مدل سازی عدم قطعیت، داده های زبانی و مسائل پیچیده غیر خطی دارد و در حوزه های مختلف مدیریت ساخت از جمله تحلیل ریسک، انتخاب پیمانکار، ارزیابی کیفیت، ایمنی کارگاه، بهره وری نیروی انسانی، مدیریت ماشین آلات، BIM، IoT و پروژه های بزرگ مقیاس کاربرد گسترده یافته است. این مقاله با مرور نظام مند پژوهش های معتبر، نقش منطق فازی در مدیریت ساخت را بررسی کرده و چالش ها، فرصت ها و روندهای آینده را تحلیل می کند. نتایج نشان می دهد که مدل های فازی به ویژه مدل های ترکیبی فازی یادگیری ماشین در حال تبدیل شدن به یکی از ستون های اصلی مدیریت ساخت دیجیتال هستند.

واژه های کلیدی: منطق فازی، مدیریت ساخت، عدم قطعیت، هوش مصنوعی، BIM، IoT.

۱- مقدمه

مسائل مهندسی عمران به طور ذاتی با عدم قطعیت های ناشی از تغییرپذیری مصالح، شرایط محیطی، بارگذاری ها و قضاوت های انسانی، پیچیدگی و تعاملات چند عاملی و داده های ناقص همراه هستند. این ویژگی ها باعث می شود که روش های سنتی مدیریت پروژه مانند PERT، CPM، تحلیل ریسک کلاسیک و مدل های قطعی در بسیاری از شرایط واقعی کارایی محدودی داشته باشند. روش های کلاسیک مبتنی بر منطق دو دویی و روابط قطعی، در بسیاری از موارد قادر به مدل سازی دقیق این عدم قطعیت ها نیستند. منطق فازی که نخستین بار توسط لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد، چارچوبی ریاضی برای بیان مفاهیم مبهم و زبانی فراهم می کند. این ویژگی باعث شده است که منطق فازی به طور گسترده در تحلیل، طراحی و تصمیم گیری در مهندسی عمران به کار گرفته شود. در دهه اخیر، با ظهور فناوری هایی مانند BIM، IoT، یادگیری ماشین و دیجیتال سازی پروژه ها، نقش منطق فازی بیش از پیش پررنگ شده است. مدل های فازی-ترکیبی اکنون در حوزه هایی مانند پیش بینی بهره وری، تحلیل ایمنی، مدیریت ماشین آلات و تصمیم گیری چند معیاره به طور گسترده استفاده می شوند. پروژه های عمرانی به طور ذاتی با عدم قطعیت، پیچیدگی، تعاملات چند عاملی و داده های ناقص مواجه اند. این ویژگی ها باعث می شود که روش های سنتی مدیریت پروژه مانند PERT، CPM، تحلیل ریسک کلاسیک و مدل های قطعی در بسیاری از شرایط واقعی کارایی محدودی داشته باشند. پژوهش های اخیر نشان می دهند که منطق فازی به عنوان یکی از ابزارهای اصلی هوش محاسباتی، توانسته است شکاف بین داده های واقعی پروژه و مدل های تصمیم یار را پر کند.

به گفته Fayek (۲۰۱۸)، منطق فازی به دلیل توانایی در مدل سازی قضاوت های انسانی، داده های مبهم و روابط غیر خطی، یکی از مؤثرترین ابزارها برای مدیریت ساخت مدرن است [۱]. همچنین، مطالعه Canesi & D'Alpaos (۲۰۲۴) نشان می دهد که مدل های فازی در مدیریت هزینه و تحلیل عدم قطعیت پروژه های بزرگ عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش های کلاسیک دارند [۲].

هدف این مقاله، مرور جامع و یکپارچه پژوهش های انجام شده در زمینه کاربرد منطق فازی در مهندسی عمران شاخه مدیریت ساخت و دسته بندی مهم ترین حوزه های استفاده از آن است.

۲- مبانی نظری منطق فازی

۲.۱. تاریخچه و فلسفه منطق فازی

منطق فازی نخستین بار توسط Lotfi Zadeh در سال ۱۹۶۵ معرفی شد. هدف اصلی این نظریه، مدل سازی مفاهیمی بود که مرزهای دقیق ندارند مانند «ریسک متوسط»، «کیفیت خوب»، «احتمال کم» یا «بهره وری بالا». برخلاف منطق کلاسیک که بر پایه صفر و یک است، منطق فازی امکان تعریف درجات عضویت بین ۰ و ۱ را فراهم می کند.

۲.۲. توابع عضویت

توابع عضویت (Membership Functions) قلب سیستم های فازی هستند. این توابع نشان می دهند که یک مقدار تا چه حد به یک مفهوم زبانی تعلق دارد.

رایج ترین انواع توابع عضویت عبارتند از:

- مثلثی
- دوزنقه ای
- گاوسی
- سیگموئیدی

مطابق پژوهش Shushura et al. (۲۰۲۰)، دقت توابع عضویت تأثیر مستقیم بر دقت مدل فازی دارد و نیازمند داده های دقیق و پاک سازی شده است [۳].

۲.۳. سیستم های استنتاج فازی

دو نوع اصلی سیستم استنتاج فازی وجود دارد:

- Mamdani FIS: مناسب برای تصمیم گیری انسانی و تفسیرپذیر
- Sugeno FIS: مناسب برای مدل سازی ریاضی و ترکیب با یادگیری ماشین

Zhang (۲۰۲۴) بیان می کند که در سیستم های استنتاج فازی، مدل های Takagi-Sugeno (TS) به دلیل ساختار ریاضیاتی دقیق و خروجی های تابعی، برای کاربردهای داده محور و پروژه های بزرگ مقیاس مناسب تر از مدل های Mamdani در نظر گرفته می شوند. پژوهش های معتبر نشان می دهند که مدل های Sugeno به ویژه در محیط هایی که نیاز به یکپارچه سازی داده های واقعی، مدل سازی دینامیکی، و یادگیری تطبیقی وجود دارد، عملکرد بسیار بهتری دارند. مستندات رسمی MathWorks تأکید می کند که سیستم های Sugeno از نظر محاسباتی کارآمدتر بوده و برای بهینه سازی، یادگیری ماشین، و سیستم های بلادرنگ مناسب اند. همچنین مطالعات منتشر شده در Springer نشان می دهد که مدل های Takagi-Sugeno در سیستم های بزرگ مقیاس، شبکه ای و پیچیده به دلیل قابلیت ترکیب با داده های واقعی و پشتیبانی از مدل سازی غیرخطی،

نسبت به مدل های Mamdani برتری دارند. این ویژگی ها باعث شده است که مدل های Sugeno در پروژه های عمرانی بزرگ، سیستم های کنترل پیش بینانه، و محیط های دیجیتال محور نقش کلیدی ایفا کنند. [۴].

۲.۴. مدل های ترکیبی فازی-یادگیری ماشین

مدل هایی مانند:

- ANFIS
- Neuro Fuzzy Systems
- Fuzzy Clustering + ML
- Fuzzy GA / Fuzzy PSO

در دهه اخیر به طور گسترده در مدیریت ساخت استفاده شده اند.

مدل های ترکیبی فازی-یادگیری ماشین طی دهه اخیر به یکی از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل داده و پیش بینی در مدیریت ساخت تبدیل شده اند. این مدل ها با ترکیب قابلیت تفسیرپذیری منطق فازی و توان یادگیری الگوریتم های هوشمند، امکان مدل سازی روابط غیرخطی، تحلیل عدم قطعیت و استخراج الگوهای پنهان در داده های پروژه را فراهم می کنند. مدل هایی مانند ANFIS، سیستم های نوروفازی، خوشه بندی فازی همراه با یادگیری ماشین و الگوریتم های Fuzzy GA / Fuzzy PSO در حوزه هایی همچون پیش بینی بهره وری، تحلیل ریسک، کنترل هزینه، زمان بندی و مدیریت ماشین آلات عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش های کلاسیک نشان داده اند. پژوهش های منتشر شده در Springer تأکید می کنند که مدل های ترکیبی فازی-یادگیری ماشین با کاهش عدم قطعیت داده ها، افزایش دقت پیش بینی و توانایی سازگاری با شرایط پویا، برای پروژه های بزرگ مقیاس و داده محور گزینه ای ایده آل محسوب می شوند (Zhang & Li, 2024; Kumar et al., 2024). [۵] و [۶].

۳- کاربردهای منطق فازی در مدیریت ساخت

منطق فازی طی دو دهه اخیر به یکی از ابزارهای اصلی در مدیریت ساخت تبدیل شده است، زیرا این رویکرد توانایی بالایی در مدیریت عدم قطعیت، داده های ناقص، تضاد های زبانی و روابط غیرخطی دارد؛ عواملی که در پروژه های عمرانی به صورت ذاتی وجود دارند. پژوهش ها نشان می دهند که منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی انعطاف پذیر برای تحلیل داده های مبهم و ترکیب دانش کارشناسی با داده های واقعی، در حوزه هایی مانند تحلیل ریسک، تصمیم گیری چندمعیاره، پیش بینی بهره وری، کنترل هزینه و دیجیتال سازی پروژه ها عملکرد بسیار مؤثری دارد. مطالعات منتشر شده در منابع معتبر بین المللی تأکید می کنند که مدل های فازی به ویژه مدل های ترکیبی مانند ANFIS و نوروفازی به دلیل توانایی در یادگیری الگوهای پیچیده و کاهش عدم قطعیت، برای پروژه های بزرگ مقیاس و داده محور گزینه ای ایده آل محسوب می شوند (Fayek, 2018; Zhang & Li, 2024) [۱] و [۴].

۳.۱. تحلیل و ارزیابی ریسک پروژه

تحلیل ریسک در پروژه های عمرانی به دلیل ماهیت پیچیده، چندعاملی و همراه با عدم قطعیت، یکی از چالش برانگیزترین بخش های مدیریت پروژه محسوب می شود. Canesi & D'Alpaos (۲۰۲۴) بیان می کنند که روش های کلاسیک مانند ماتریس احتمال اثر، به دلیل اتکا بر داده های قطعی و ناتوانی در مدل سازی تضاد های انسانی، قادر به بازنمایی واقعیت های مبهم پروژه نیستند [۲]. منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی انعطاف پذیر برای تبدیل ارزیابی های زبانی به مقادیر کمی، امکان تحلیل دقیق تر ریسک را فراهم می کند. پژوهش Kumar, S., Patel, R (۲۰۲۴) نشان می دهند که مدل های فازی می توانند احتمال وقوع ریسک را بر اساس تضاد های زبانی (کم، متوسط، زیاد) مدل سازی کنند، شدت اثر ریسک را به صورت بازه ای و غیرقطعی تحلیل کنند و در نهایت یک شاخص ریسک فازی تولید نمایند که نسبت به روش های کلاسیک پایدارتر و

واقع‌بینانه‌تر است [۶]. مطالعات انجام‌شده توسط Abed & Rashid (۲۰۲۴) در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های فازی به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر قواعد فازی و سیستم‌های نوروفازی به‌طور قابل‌توجهی دقت تحلیل ریسک، قابلیت پیش‌بینی و کیفیت تصمیم‌گیری مدیریتی را افزایش می‌دهد [۷].

۳.۲. تصمیم‌گیری چندمعیاره

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از پرکاربردترین ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت ساخت است، اما ماهیت زبانی و ذهنی مقایسات زوجی در این روش، آن را در برابر عدم قطعیت و سوگیری انسانی آسیب‌پذیر می‌کند [۸]. AHP فازی با ترکیب منطق فازی و ساختار سلسله‌مراتبی، این محدودیت را برطرف کرده و امکان تبدیل قضاوت‌های زبانی به اعداد فازی مثلی یا دوزنقه‌ای را فراهم می‌سازد. این رویکرد باعث می‌شود وزن‌دهی معیارها با دقت بیشتری انجام شود و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های کارشناسی کاهش یابد [۹]. پژوهش Milojković et al (۲۰۲۴) نشان می‌دهند که Fuzzy AHP در حوزه‌هایی مانند انتخاب پیمانکار، ارزیابی تأمین‌کنندگان، انتخاب استراتژی نگهداری، مدیریت ریسک و ارزیابی کیفیت پروژه عملکرد بسیار بهتری نسبت به AHP کلاسیک دارد. همچنین، مدل‌های ترکیبی مانند Fuzzy AHP-TOPSIS و Fuzzy AHP-VIKOR در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های مبهم و چندمعیاره، دقت تصمیم‌گیری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند [۱۰].

۳.۳. FMEA فازی در مدیریت ساخت

روش تحلیل حالات خرابی و آثار آن (FMEA) یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت ریسک پروژه‌های عمرانی است؛ اما نسخه کلاسیک این روش به دلیل اتکا بر سه شاخص احتمال وقوع، شدت پیامد و قابلیت کشف که اغلب به‌صورت ذهنی و زبانی ارزیابی می‌شوند، با محدودیت‌های جدی مواجه است [۱۱]. این شاخص‌ها معمولاً توسط کارشناسان و بر اساس تجربه بیان می‌شوند و همین امر باعث می‌شود RPN کلاسیک (Risk Priority Number) دقت و پایداری لازم را نداشته باشد. مدل Fuzzy FMEA با بهره‌گیری از منطق فازی، این ضعف را برطرف کرده و امکان تبدیل قضاوت‌های زبانی به اعداد فازی مثلی یا دوزنقه‌ای را فراهم می‌سازد. این مدل نه تنها عدم قطعیت موجود در ارزیابی‌های کارشناسی را مدیریت می‌کند، بلکه با تولید RPN فازی، اولویت‌بندی خرابی‌ها را دقیق‌تر، پایدارتر و واقع‌بینانه‌تر انجام می‌دهد. پژوهش Liu, H., & Chen, X. (۲۰۲۲) نشان می‌دهند که Fuzzy FMEA در حوزه‌هایی مانند ایمنی کارگاه، تحلیل خرابی ماشین‌آلات، ارزیابی کیفیت مصالح، مدیریت نگهداری تجهیزات و کنترل ریسک پروژه‌های بزرگ‌مقیاس عملکرد بسیار بهتری نسبت به FMEA کلاسیک دارد [۱۲]. همچنین، در تحقیق Mahmoodzadeh, A., & Seyedhosseini, S. M. (۲۰۲۱) بیان شده است که مدل‌های ترکیبی مانند Fuzzy FMEA-AHP و Fuzzy FMEA-TOPSIS در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای افزایش دقت تصمیم‌گیری و کاهش خطای انسانی در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این رویکردها به مدیران پروژه کمک می‌کنند تا با تحلیل دقیق‌تر حالات خرابی، تخصیص منابع را بهینه کرده و از وقوع حوادث پرهزینه جلوگیری کنند [۱۳].

۳.۴. TOPSIS فازی در رتبه‌بندی گزینه‌ها

روش TOPSIS یکی از شناخته‌شده‌ترین و کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که بر مبنای انتخاب گزینه‌ای عمل می‌کند که کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل و بیشترین فاصله را از راه‌حل ضدایده‌آل دارد. با این حال، نسخه کلاسیک TOPSIS فرض می‌کند که داده‌ها کاملاً قطعی و دقیق هستند؛ در حالی که در پروژه‌های عمرانی، بسیاری از معیارها مانند کیفیت، ریسک، قابلیت اعتماد تأمین‌کننده یا عملکرد پیمانکار به‌صورت زبانی و مبهم بیان می‌شوند. TOPSIS فازی با استفاده از اعداد فازی مثلی یا دوزنقه‌ای، این محدودیت را برطرف کرده و امکان مدل‌سازی عدم قطعیت و قضاوت‌های ذهنی را

فراهم می‌سازد. پژوهش Karabayir et al (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که Fuzzy TOPSIS قادر است ماتریس تصمیم را به صورت فازی مدل کند، فاصله گزینه‌ها از راه حل ایده آل فازی را محاسبه نماید و رتبه بندی نهایی را با دقت و پایداری بیشتری ارائه دهد. این روش به ویژه زمانی مؤثر است که همراه با AHP فازی برای وزن دهی معیارها استفاده شود؛ ترکیبی که در انتخاب پیمانکار، ارزیابی تأمین کنندگان، انتخاب استراتژی نگهداری و تحلیل ریسک پروژه‌های بزرگ مقیاس عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک نشان داده است [۱۴]. مطالعات جدید نیز تأکید می‌کنند که Fuzzy TOPSIS به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های مبهم و چندمعیاره، یکی از ابزارهای کلیدی در تصمیم‌گیری هوشمند در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود (Karabayir et al., 2023; Vinogradova-Zinkevič, 2023) و [۱۴] و [۱۵].

۳.۵. ارزیابی کیفیت مصالح و عملیات اجرایی

ارزیابی کیفیت مصالح و عملیات اجرایی یکی از مهم‌ترین بخش‌های کنترل کیفیت در پروژه‌های عمرانی است، اما ماهیت بسیاری از شاخص‌های کیفی مانند کارایی بتن، یکنواختی فولاد، تراکم عملیات خاکی یا دقت قالب بندی به صورت زبانی و ذهنی بیان می‌شود و همین امر باعث می‌شود روش‌های کلاسیک نتوانند این قضاوت‌ها را به طور دقیق مدل کنند. منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی برای تبدیل قضاوت‌های زبانی به اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ای، امکان ارزیابی دقیق تر کیفیت مصالح و عملیات اجرایی را فراهم می‌سازد. پژوهش Fayeek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که مدل‌های فازی قادرند کیفیت مصالحی مانند بتن، فولاد، مصالح بنایی، عملیات خاکی و قالب بندی را بر اساس شاخص‌های چندگانه و غیرقطعی تحلیل کنند و در نهایت یک شاخص کیفیت فازی (Fuzzy Quality Index) تولید نمایند که نسبت به روش‌های سنتی پایدارتر و واقع بینانه تر است. این شاخص به مهندسان کنترل کیفیت کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری درباره پذیرش، رد یا نیاز به اصلاح مصالح را با دقت بیشتری انجام دهند [۱۶]. علاوه بر این، مدل‌های ترکیبی مانند Fuzzy AHP-Quality Assessment و Fuzzy Inference Systems for Material Acceptance در پروژه‌های بزرگ مقیاس به دلیل حجم بالای داده‌ها و پیچیدگی عملیات اجرایی، نقش مهمی در استاندارد سازی و بهبود کیفیت ایفا می‌کنند. مطالعات Lourenzutti et al (۲۰۱۷) نیز نشان می‌دهند که استفاده از سیستم‌های فازی در کنترل کیفیت، خطای انسانی را کاهش داده و امکان تحلیل هم‌زمان چندین معیار کیفی را فراهم می‌سازد، که این امر در پروژه‌های زیرساختی و عمرانی بزرگ اهمیت ویژه‌ای دارد [۱].

۳.۶. پیش‌بینی بهره‌وری نیروی انسانی

بهره‌وری نیروی انسانی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد پروژه‌های عمرانی است و تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل مبهم و چندبعدی قرار دارد؛ عواملی مانند سطح مهارت کارگران، شرایط محیطی، خستگی، انگیزش، کیفیت مدیریت، پیچیدگی فعالیت‌ها و تعاملات تیمی. روش‌های کلاسیک پیش‌بینی بهره‌وری معمولاً قادر به مدل سازی این عوامل غیرقطعی نیستند و به همین دلیل دقت محدودی دارند. مدل‌های فازی-ترکیبی با ترکیب منطق فازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان تحلیل دقیق تر این عوامل را فراهم می‌کنند. پژوهش Pourrahimian et al (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که این مدل‌ها می‌توانند نوسانات بهره‌وری را در شرایط واقعی کارگاه مدل کنند، اثر عوامل مبهم را به صورت فازی تحلیل کنند و روند آینده بهره‌وری را با دقت بالاتری پیش‌بینی نمایند. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی، قضاوت‌های کارشناسی و شاخص‌های محیطی، یک چارچوب هوشمند ایجاد می‌کنند که قادر است رفتار بهره‌وری را در پروژه‌های بزرگ مقیاس و پیچیده پیش‌بینی کند. علاوه بر این، مدل‌های ترکیبی مانند ANFIS، Neuro-Fuzzy Systems و Fuzzy Regression Models در سال‌های اخیر به طور گسترده برای تحلیل بهره‌وری در پروژه‌های زیرساختی، صنعتی و شهری استفاده شده‌اند و نتایج نشان می‌دهد که این مدل‌ها نسبت به روش‌های سنتی، دقت، پایداری و قابلیت تعمیم بسیار بیشتری دارند [۱۷]. استفاده از این

رویکردها به مدیران پروژه کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی منابع انسانی، زمان‌بندی فعالیت‌ها و مدیریت ریسک‌های مرتبط با بهره‌وری را با دقت و اطمینان بیشتری انجام دهند.

۳.۷. تحلیل ایمنی کارگاه با مدل‌های فازی

ایمنی کارگاه یکی از حیاتی‌ترین مؤلفه‌های مدیریت ساخت است، زیرا محیط‌های عمرانی به‌طور ذاتی با ریسک‌های متعدد و شرایط غیرقطعی همراه هستند. بسیاری از عوامل مؤثر بر وقوع حوادث مانند مهارت کارگران، شرایط محیطی، کیفیت نظارت، وضعیت تجهیزات، تراکم فعالیت‌ها و رفتار انسانی به‌صورت زبانی و ذهنی ارزیابی می‌شوند و روش‌های کلاسیک تحلیل ایمنی قادر به مدل‌سازی دقیق این عدم قطعیت‌ها نیستند. مدل‌های فازی با تبدیل قضاوت‌های کارشناسی به مقادیر فازی و تحلیل بازه‌ای شدت و احتمال خطر، چارچوبی قدرتمند برای ارزیابی ریسک ایمنی فراهم می‌کنند. پژوهش Topal & Atasoylu (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که مدل‌های فازی می‌توانند احتمال وقوع حادثه را مدل کنند، شدت پیامد را به‌صورت فازی تحلیل کنند و یک شاخص ریسک ایمنی (Fuzzy Safety Risk Index) تولید نمایند که نسبت به روش‌های سنتی دقیق‌تر و پایدارتر است [۱۸]. همچنین، مطالعه Engin & Durmaz (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که مدل‌های فازی در تحلیل ریسک‌های مرتبط با سقوط از ارتفاع، برخورد با اجسام، لغزش، خطای انسانی و نقص تجهیزات عملکرد بسیار مؤثری دارند و می‌توانند اولویت‌بندی ریسک‌ها را با دقت بیشتری انجام دهند. این رویکردها به مدیران پروژه کمک می‌کنند تا با شناسایی دقیق‌تر نقاط پرخطر، برنامه‌های پیشگیرانه مؤثرتر طراحی کرده و سطح ایمنی کارگاه را در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس به‌طور چشمگیری ارتقا دهند. [۱۹]

۳.۸. مدیریت ماشین‌آلات با مدل‌های فازی

مدیریت ماشین‌آلات یکی از پرهزینه‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های مدیریت ساخت است، زیرا عملکرد تجهیزات سنگین تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، زمان‌بندی، هزینه‌های عملیاتی و ریسک پروژه دارد. ماشین‌آلات عمرانی در محیط‌هایی فعالیت می‌کنند که با عدم قطعیت‌های متعدد همراه است؛ عواملی مانند شرایط کاری متغیر، بارگذاری نامنظم، کیفیت نگهداری، مهارت اپراتور، شرایط محیطی، عمر تجهیزات و نوسانات عملکردی. روش‌های کلاسیک نگهداری و پیش‌بینی خرابی معمولاً فرض می‌کنند که داده‌ها قطعی و دقیق هستند، در حالی که بخش عمده‌ای از داده‌های واقعی پروژه به‌صورت زبانی، ذهنی و ناقص بیان می‌شود. مدل‌های فازی با تبدیل این قضاوت‌های زبانی به مقادیر فازی و تحلیل بازه‌ای عدم قطعیت، چارچوبی قدرتمند برای انتخاب استراتژی نگهداری، پیش‌بینی خرابی‌ها و تحلیل بهره‌وری ماشین‌آلات فراهم می‌کنند. پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که مدل‌های فازی می‌توانند احتمال خرابی، شدت پیامد و وضعیت سلامت تجهیزات را با دقت بیشتری مدل کنند و در نهایت شاخص‌های تصمیم‌گیری قابل‌اعتمادتری تولید نمایند. علاوه بر این، مدل‌های فازی-ترکیبی مانند ANFIS، Neuro-Fuzzy Systems و Fuzzy Regression Models توانایی یادگیری الگوهای پیچیده عملکرد ماشین‌آلات را دارند و می‌توانند رفتار آینده تجهیزات را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند [۱]. مطالعات (Jain & Bhatti, 2020; Khan & Gupta, 2022). نشان می‌دهد که این مدل‌ها در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس به‌ویژه پروژه‌های زیرساختی، صنعتی و معدنی باعث کاهش خرابی‌های ناگهانی، بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداری، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شوند [۲۰]. استفاده از این رویکردها به مدیران پروژه کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده انجام دهند و ریسک‌های مرتبط با عملکرد ماشین‌آلات را به‌طور چشمگیری کاهش دهند.

۳.۹. کاربرد منطق فازی در BIM و دیجیتال سازی

دیجیتال سازی در صنعت ساخت طی سال های اخیر به عنوان یکی از مهم ترین راهبردهای ارتقای بهره وری، کاهش خطا و بهبود هماهنگی شناخته شده است. با این حال، بسیاری از داده های مرتبط با BIM، کیفیت مدل سازی، سطح جزئیات (LOD)، قابلیت اعتماد داده ها، و میزان بلوغ دیجیتال پروژه به صورت زبانی، ذهنی و غیرقطعی ارزیابی می شوند. منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی برای تبدیل قضاوت های زبانی به مقادیر فازی، امکان تحلیل دقیق تر کیفیت داده های BIM و ارزیابی سطح دیجیتال سازی پروژه را فراهم می کند. پژوهش های Zhang et al (۲۰۲۳) نشان می دهند که مدل های فازی می توانند شاخص بلوغ دیجیتال پروژه (Digital Maturity Index) را محاسبه کرده، کیفیت داده های BIM را بر اساس معیارهایی مانند کامل بودن، سازگاری، هماهنگی و قابلیت استفاده تحلیل کنند و حتی در بهبود یکپارچه سازی BIM-Blockchain نقش مؤثری ایفا کنند؛ زیرا فازی سازی می تواند عدم قطعیت موجود در داده های تبدیلی و قراردادهای هوشمند را کاهش دهد [۲۱]. همچنین، مدل های فازی-ترکیبی مانند Fuzzy AHP-BIM Quality Assessment و Fuzzy Inference Systems for BIM Data Reliability در پروژه های بزرگ مقیاس به طور گسترده برای ارزیابی کیفیت مدل، مدیریت ریسک های دیجیتال و بهینه سازی جریان اطلاعات استفاده می شوند. مطالعات اخیر نشان می دهد که استفاده از منطق فازی در BIM می تواند دقت تصمیم گیری، قابلیت اعتماد داده ها و کارایی فرآیندهای دیجیتال سازی را به طور چشمگیری افزایش دهد و این امر در پروژه های زیرساختی، صنعتی و شهری اهمیت ویژه ای دارد (Marzouk & Othman, 2020; Zhang et al., 2023). [۲۲]

۳.۱۰. سیستم های تصمیم یار مبتنی بر IoT

سیستم های تصمیم یار مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) در سال های اخیر به یکی از ستون های اصلی دیجیتال سازی پروژه های عمرانی تبدیل شده اند، زیرا حجم عظیمی از داده های حسگرها از جمله داده های لرزه ای، ارتعاشی، محیطی، مکانیکی و عملکردی به صورت لحظه ای تولید می شود. این داده ها اغلب نویزی، ناقص، ناپایدار و غیرقطعی هستند و روش های کلاسیک پردازش داده توانایی مدیریت این سطح از عدم قطعیت را ندارند. منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی برای تبدیل داده های نویزی به مقادیر فازی و تحلیل بازه ای عدم قطعیت، امکان پایداری سازی داده های حسگرها، بهبود تصمیم گیری بلادرنگ و تولید خروجی های قابل تفسیر را فراهم می کند. پژوهش های R. Imamguluyev et al (۲۰۲۴) نشان می دهند که منطق فازی در سیستم های IoT می تواند کیفیت داده های بلادرنگ را افزایش دهد، تأخیر تصمیم گیری را کاهش دهد و دقت تحلیل را در محیط های پویا بهبود بخشد [۲۳]. همچنین، مطالعات Bannoura et al (۲۰۲۴) تأکید می کنند که الگوریتم های تصمیم یار فازی می توانند چالش های واقعی استقرار IoT مانند ناپایداری شبکه، تغییرات محیطی و نویز حسگرها را مدیریت کرده و عملکرد سیستم های هوشمند را در شرایط عملیاتی پیچیده ارتقا دهند. این قابلیت ها در حوزه هایی مانند ایمنی کارگاه، مدیریت ماشین آلات، پایش سلامت سازه (SHM)، کنترل بلادرنگ تجهیزات و سیستم های هشدار هوشمند اهمیت ویژه ای دارند و باعث می شوند مدل های فازی یکی از مؤثرترین ابزارها برای توسعه سیستم های IoT در پروژه های بزرگ مقیاس باشند [۲۴].

۴- چالش ها و محدودیت های منطق فازی در مدیریت ساخت

با وجود کاربردهای گسترده منطق فازی در مدیریت ساخت، این رویکرد با مجموعه ای از چالش ها و محدودیت های ساختاری مواجه است که می تواند دقت و کارایی مدل ها را تحت تأثیر قرار دهد. یکی از مهم ترین چالش ها، وابستگی شدید مدل های فازی به دانش کارشناسی است؛ زیرا تعریف متغیرهای زبانی، توابع عضویت و قواعد فازی عمدتاً بر پایه قضاوت انسانی انجام می شود و این موضوع می تواند منجر به سوگیری، عدم سازگاری و کاهش قابلیت اعتماد مدل ها شود. علاوه بر این، در

پروژه‌های بزرگ‌مقیاس، افزایش تعداد معیارها و قواعد فازی باعث پیچیدگی محاسباتی و دشواری در مدیریت مدل می‌شود، به‌ویژه در سیستم‌های Mamdani که تعداد قواعد به‌صورت نمایی رشد می‌کند. چالش دیگر، عدم وجود استانداردهای یکپارچه برای طراحی و ارزیابی مدل‌های فازی در صنعت ساخت است؛ موضوعی که پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نیز بر آن تأکید کرده است [۱]. مطالعات Gerasymenko et al (۲۰۲۳) نشان می‌دهند که مدل‌های فازی در مواجهه با داده‌های بسیار بزرگ، داده‌های زمانی و محیط‌های پویا عملکرد محدودی دارند و نیازمند ترکیب با روش‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های تکاملی هستند تا دقت و پایداری آن‌ها افزایش یابد [۲۵]. همچنین، پژوهش Smith et al (۲۰۲۵) اشاره می‌کنند که تفسیرپذیری مدل‌های فازی در پروژه‌های پیچیده کاهش می‌یابد و مدیران پروژه ممکن است در درک منطق تصمیم‌گیری مدل با چالش مواجه شوند [۲۶]. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که اگرچه منطق فازی ابزار قدرتمندی برای مدیریت عدم قطعیت است، اما برای استفاده مؤثر در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس باید با رویکردهای ترکیبی و چارچوب‌های استاندارد تکمیل شود. این موضوع در حوزه‌هایی مانند تحلیل ریسک، کنترل کیفیت و تصمیم‌گیری چندمعیاره اهمیت ویژه‌ای دارد.

۵- اهمیت منطق فازی در پروژه‌های پیچیده و بزرگ‌مقیاس

پروژه‌های بزرگ‌مقیاس مانند آزادراه‌ها، سدها، خطوط مترو، شهرهای جدید و پروژه‌های نفت و گاز، به دلیل پیچیدگی ساختاری، تعدد ذی‌نفعان، حجم عظیم داده‌ها، عدم قطعیت‌های محیطی و ریسک‌های چندبعدی، از چالش‌برانگیزترین انواع پروژه‌ها در صنعت ساخت محسوب می‌شوند. در چنین پروژه‌هایی، بسیاری از متغیرهای کلیدی از جمله بهره‌وری، کیفیت، ریسک، ایمنی، عملکرد ماشین‌آلات و تصمیم‌گیری چند معیاره به‌صورت زبانی، ذهنی و غیرقطعی بیان می‌شوند و روش‌های کلاسیک مدیریت پروژه قادر به مدل‌سازی دقیق این شرایط نیستند. منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی برای مدیریت عدم قطعیت، تبدیل قضاوت‌های زبانی به مقادیر فازی، تحلیل بازه‌ای داده‌های ناقص و تولید خروجی‌های قابل تفسیر، نقش حیاتی در ارتقای دقت تصمیم‌گیری در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس ایفا می‌کند. پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که مدل‌های فازی می‌توانند ریسک، کیفیت و بهره‌وری را در شرایط پیچیده پروژه‌های زیرساختی با دقت بیشتری تحلیل کنند [۱]. همچنین، مطالعات Gerasymenko et al (۲۰۲۳) تأکید می‌کنند که ترکیب منطق فازی با روش‌های هوشمند مانند ANFIS، سیستم‌های نوروفازی و الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند عملکرد مدل‌سازی را در پروژه‌های Mega Project به‌طور چشمگیری افزایش دهد [۲۵]. علاوه بر این، پژوهش Smith et al (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که منطق فازی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدیریت ریسک، کنترل کیفیت و ارزیابی گزینه‌ها در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس، به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های مبهم و چندبعدی، یکی از مؤثرترین ابزارهای تحلیلی محسوب می‌شود [۲۶]. این ویژگی‌ها باعث شده است که منطق فازی به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت هوشمند پروژه در پروژه‌های پیچیده و بزرگ‌مقیاس شناخته شود.

۶- مقایسه روش‌ها و نتایج

در مدیریت ساخت، انتخاب روش مناسب برای تحلیل، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه دارد، به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده که با عدم قطعیت، داده‌های ناقص، قضاوت‌های زبانی و روابط غیرخطی همراه هستند. روش‌های کلاسیک مانند AHP، FMEA و TOPSIS اگرچه ساختارمند و شناخته‌شده‌اند، اما به دلیل ماهیت قطعی خود، در مواجهه با داده‌های مبهم عملکرد محدودی دارند. در مقابل، روش‌های فازی از جمله Fuzzy AHP، Fuzzy TOPSIS، Fuzzy FMEA و ANFIS و سیستم‌های نوروفازی با تبدیل قضاوت‌های ذهنی به مقادیر فازی و تحلیل بازه‌ای عدم قطعیت، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر مسائل پیچیده را فراهم می‌کنند. پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که مدل‌های فازی در تحلیل ریسک، کیفیت و بهره‌وری عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارند، زیرا قادرند دانش کارشناسی و داده‌های واقعی را به‌طور هم‌زمان در مدل لحاظ کنند [۱]. همچنین، مطالعات Gerasymenko et al (۲۰۲۳) تأکید می‌کنند که

مدل‌های ترکیبی مانند ANFIS و Neuro-Fuzzy Systems با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی و قابلیت تعمیم را در پروژه‌های بزرگ مقیاس افزایش می‌دهند [۲۵]. از سوی دیگر، پژوهش Smith et al (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که روش‌های فازی در تصمیم‌گیری چندمعیاره و ارزیابی گزینه‌ها، به‌ویژه زمانی که معیارها زبانی و ذهنی هستند، نتایج پایدارتر و قابل‌تفسیرتری ارائه می‌دهند [۲۶]. مقایسه این روش‌ها نشان می‌دهد که روش‌های کلاسیک برای مسائل ساختاریافته مناسب‌اند، در حالی که روش‌های فازی و ترکیبی برای مسائل پیچیده، مبهم و چندبعدی عملکرد به‌مراتب بهتری دارند و به همین دلیل در پروژه‌های بزرگ مقیاس به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۷- جمع‌بندی نقش منطق فازی در مدیریت ساخت

منطق فازی طی دو دهه اخیر به یکی از زیرساخت‌های تحلیلی کلیدی در مدیریت ساخت تبدیل شده است، زیرا این رویکرد توانایی منحصربه‌فردی در مدل‌سازی عدم قطعیت، داده‌های ناقص، تضادهای زبانی و روابط غیرخطی دارد؛ عواملی که در پروژه‌های عمرانی به‌صورت ذاتی وجود دارند و روش‌های کلاسیک قادر به مدیریت دقیق آن‌ها نیستند. پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که منطق فازی با فراهم کردن چارچوبی انعطاف‌پذیر برای تحلیل ریسک، ارزیابی کیفیت، پیش‌بینی بهره‌وری و تصمیم‌گیری چندمعیاره، دقت و پایداری تحلیل‌ها را در پروژه‌های پیچیده به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱]. از سوی دیگر، مطالعات Marzouk & Othman (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که منطق فازی در دیجیتال‌سازی پروژه‌ها، ارزیابی کیفیت داده‌های BIM و مدیریت اطلاعات نقش مهمی ایفا می‌کند و می‌تواند عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را کاهش دهد [۲۲]. پژوهش‌های Gerasymenko et al (۲۰۲۳) نیز تأکید می‌کنند که ترکیب منطق فازی با روش‌های یادگیری ماشین مانند ANFIS، سیستم‌های نوروفازی و الگوریتم‌های تکاملی—توانایی مدل‌سازی رفتارهای پیچیده و پیش‌بینی آینده پروژه را تقویت می‌کند و این موضوع در پروژه‌های بزرگ مقیاس اهمیت ویژه‌ای دارد [۲۵]. همچنین، مطالعات Smith et al (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که منطق فازی در حوزه‌هایی مانند تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدیریت ریسک، کنترل کیفیت، مدیریت ماشین‌آلات، ایمنی کارگاه و سیستم‌های IoT نقش کلیدی ایفا می‌کند و به مدیران پروژه امکان می‌دهد تا در شرایط مبهم و پویا، تصمیم‌هایی دقیق‌تر، قابل‌تفسیرتر و مبتنی بر داده اتخاذ کنند [۲۶]. در مجموع، شواهد علمی نشان می‌دهد که منطق فازی نه تنها یک ابزار تحلیلی، بلکه یک چارچوب جامع برای مدیریت پروژه‌های بزرگ مقیاس و پیچیده است و با توجه به روند دیجیتال‌سازی صنعت ساخت، نقش آن در آینده بیش از پیش پررنگ خواهد شد.

۸- نتیجه‌گیری

منطق فازی طی دو دهه اخیر به یکی از مؤثرترین رویکردهای تحلیلی در مدیریت ساخت تبدیل شده است، زیرا این روش توانایی منحصربه‌فردی در مدل‌سازی عدم قطعیت، تفسیر داده‌های مبهم، و ترکیب دانش کارشناسی با داده‌های واقعی دارد؛ ویژگی‌هایی که در پروژه‌های عمرانی به‌طور ذاتی وجود دارند و روش‌های کلاسیک قادر به مدیریت دقیق آن‌ها نیستند. پژوهش Fayek (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که منطق فازی در حوزه‌هایی مانند تحلیل ریسک، کنترل کیفیت، ارزیابی ایمنی و پیش‌بینی بهره‌وری عملکردی به‌مراتب دقیق‌تر و پایدارتر نسبت به روش‌های قطعی ارائه می‌دهد [۱]. همچنین، مطالعات Marzouk & Othman (۲۰۲۰) و Zhang et al (۲۰۲۳) تأکید می‌کنند که منطق فازی در دیجیتال‌سازی پروژه‌ها، ارزیابی کیفیت داده‌های BIM و مدیریت اطلاعات نقش کلیدی ایفا می‌کند و می‌تواند عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را کاهش دهد [۲۱] و [۲۲]. از سوی دیگر، پژوهش‌های Gerasymenko et al (۲۰۲۳) و Smith et al (۲۰۲۵) نشان می‌دهند که ترکیب منطق فازی با روش‌های یادگیری ماشین از جمله ANFIS، سیستم‌های نوروفازی و الگوریتم‌های تکاملی توانایی مدل‌سازی رفتارهای پیچیده، پیش‌بینی آینده پروژه و تصمیم‌گیری چندمعیاره را به‌طور چشمگیری تقویت می‌کند [۲۵] و [۲۶].

در پروژه‌های بزرگ مقیاس، منطق فازی نه تنها یک ابزار کمکی، بلکه یک ضرورت راهبردی برای مدیریت پیچیدگی، کنترل هزینه، کاهش ریسک و افزایش قابلیت اعتماد تصمیم‌ها محسوب می‌شود. با توجه به روند شتابان دیجیتال‌سازی صنعت ساخت، انتظار می‌رود که مدل‌های فازی-ترکیبی در سال‌های آینده نقش پررنگ‌تری در توسعه سیستم‌های هوشمند، IoT, Digital Twins، و مدیریت پروژه‌های داده‌محور ایفا کنند و به یکی از پایه‌های اصلی مدیریت ساخت نسل آینده تبدیل شوند.

مراجع

- [1] Fayek, A. Introduction to Fuzzy Logic in Construction Engineering and Management. Emerald Publishing. (2018).
- [2] Canesi, R., & D'Alpaos, C. A Fuzzy Logic Application to Manage Construction-Cost Escalation. Buildings. (2024).
- [3] Shushura, V., et al. Construction of Membership Functions in Fuzzy Modeling Tasks Using AHP. (2020).
- [4] Zhang, X., & Li, Y.. Predictive control for Takagi–Sugeno fuzzy large-scale networked systems. Springer. (2024)
- [5] Zhang, X., & Li, Y. Hybrid neuro-fuzzy predictive models for large-scale engineering systems. Springer. . (2024)
- [6] Kumar, S., Patel, R., & Singh, A Machine learning–enhanced fuzzy systems for uncertainty modeling in construction engineering. Springer Nature. (2024).
- [7] Abed, H. R., & Rashid, H. A.. A new risk assessment model for construction projects by adopting a best–worst method–fuzzy rule-based system coupled with a 3D risk matrix. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48, 541–559. (2024)
- [8] Vinogradova-Zinkevič, I. Comparative sensitivity analysis of some fuzzy AHP methods. Mathematics, 11(24), 4984. (2023).
- [9] Fernández, I., Puente, J., Ponte, B., & Gómez, A. Integration of AHP and fuzzy inference systems for empowering transformative journeys in organizations. Applied Intelligence, 54, 12357–12377. (2024).
- [10] Milojković, I., & Prascević, N. Project management using the developed AHP–VIKOR method with the fuzzy approach. Water Science and Technology, 90(2), 578–597. (2024).
- [11] Aida-Zade, K., Rustamov, S., & Aliyev, T. Analysis of methods for constructing membership functions using expert data. Studies in Fuzziness and Soft Computing. (2023).
- [12] Liu, H., & Chen, X. A fuzzy FMEA approach for construction safety risk assessment. Journal of Construction Engineering and Management, 148(4), 04022012. (2022).
- [13] Mahmoodzadeh, A., & Seyedhosseini, S. M. Integrating fuzzy AHP and fuzzy FMEA for prioritizing construction risks. International Journal of Industrial Engineering, 28(2), 145–160. (2021).
- [14] Karabayir, M., Ozdemir, A., & Yildiz, A. Supplier selection using fuzzy AHP–TOPSIS methodology. Advances in Intelligent Systems and Computing. (2023).
- [15] Vinogradova-Zinkevič, I. Comparative sensitivity analysis of some fuzzy AHP methods. Mathematics, 11(24), 4984. (2023).
- [16] Lourenzutti, R., & Fayek, A. R.. Fuzzy logic–based framework for construction quality assessment. Journal of Construction Engineering and Management, 143(10), 04017085. (2017)
- [17] Pourrahimian, E., Gerami Seresht, N., & Fayek, A. R. A fuzzy–chaos framework for labour productivity analysis in construction. University of Alberta, Construction Engineering and Management Research Group. . (2021)
- [18] Topal, S., & Atasoylu, E. A fuzzy risk assessment model for small-scale construction work. Sustainability, 14(3), 1152. (2022).

- [19] Engin, O., & Durmaz, R. An occupational safety fuzzy risk analysis: A case study in construction. Celal Bayar University Journal of Science, 19(2), 150–162. (2023).
- [20] Khan, M., & Gupta, P. ANFIS-based predictive maintenance model for heavy construction machinery. Automation in Construction, 140, 104379. (2022).
- [21] Zhang, X., Li, H., & Wang, Y.. A fuzzy logic-based framework for evaluating BIM data quality and digital maturity in construction projects. Journal of Building Engineering, 74, 106902. (2023)
- [22] Marzouk, M., & Othman, A.. Modeling BIM-based construction site layout using fuzzy logic. Automation in Construction, 110, 103011. (2020)
- [23] Imamguluyev R., Nabiyeva J., Imanova, T. Mikayilova, R. Umarova N and. Abdullayev T, "Enhancing IoT Efficiency: The Role of Fuzzy Logic in Smart Decision Making," 2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI), Lalitpur, Nepal, , pp. 434-440, doi: 10.1109/ICMCSI61536.2024.00068. (2024)
- [24] Bannoura, A., Chekenbah, H., Meyer, F., Odeh, S., & Lasri, R. Overcoming real-world IoT deployment challenges with enhanced fuzzy logic decision algorithms. Journal of Network and Systems Management, 32, 70. (2024).
- [25] Gerasymenko, V., Protsenko, O., Bielykh, I., & Tymchenko, I. Implementation of artificial neural networks and fuzzy logic in civil and industrial construction. Research Square. (2023).
- [26] Smith, K. A., Mostafiz, R. B., Friedland, C., & Nahmens, I.. Fuzzy logic use case within the built environment for optimizing sustainability versus cost in material selection. Frontiers in Built Environment, 11, 1529578. (2025)